

# ВЫБОР ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ СОПЕЛ ЛАВАЛЯ ДЛЯ ЭНЕРГОСИЛОВОЙ УСТАНОВКИ, РАБОТАЮЩЕЙ НА СЖИЖЕННОЙ УГЛЕКИСЛОТЕ В ОБЛАСТИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

Шамровский Д.А., Пронь Л.В.

Конструкторское бюро «Южное», Днепропетровский государственный университет, г. Днепропетровск, Украина

Для создания тяговых усилий по различным каналам управления («Тангаж», «Рыскание» и «Крен») летательных аппаратов, способных двигаться в безвоздушном пространстве, применяются реактивные энергосиловые установки (ЭСУ). Усилия создаются при помощи сопел Лавалья, рабочим телом которых могут служить продукты сгорания традиционных видов жидких и твердых ракетных топлив, сжатые газы и вскипающие жидкости.

В конце 80-х, начале 90-х годов в ГKB «Южное» была спроектирована, отработана и сдана в эксплуатацию ЭСУ, рабочим телом которой была выбрана сжиженная углекислота. ЭСУ была предназначена для обеспечения программного движения летательного аппарата на внеатмосферном (свыше 50 км) участке траектории. Выбор рабочего тела для нее был сделан исходя из ряда преимуществ сжиженной углекислоты по сравнению с различными видами традиционных рабочих тел. Основными критериями выбора рабочего тела были вес установки в заправленном состоянии, безопасность и стоимость отработки отдельных узлов и агрегатов. По весовой сводке ЭСУ на сжиженной углекислоте выигрывала у рассмотренных вариантов установок на сжатых газах прежде всего за счет веса баллона для хранения рабочего тела, который, вследствие малого давления и большой плотности углекислоты в эксплуатационном диапазоне температур можно было сделать достаточно легким. ЭСУ с применением в качестве рабочего тела продуктов сгорания, например, моноотоплива ОТ-720, несмотря на некоторый выигрыш по весу в заправленном состоянии заметно проигрывали по сложности, стоимости и безопасности отработки и эксплуатации. Все эти соображения привели к тому, что для данной ЭСУ в качестве рабочего тела была выбрана именно сжиженная углекислота. Причем, на момент разработки в мировой практике не были известны устройства для создания тяги, в которых одновременно происходили бы газификация и ускорение потока рабочего тела.

Задача определения необходимого для ЭСУ количества рабочего

тела потребовала знания фактической величины удельного импульса сопел Лавала, работающих на сжиженной углекислоте. С этой целью были проведены необходимые расчеты и автономные испытания модельных сопел в атмосфере и в условиях искусственного разрежения (в барокамере). Сравнение результатов расчетов с данными испытаний показало, что параметры потока двухфазной среды и характер их изменения не поддаются расчетам по газодинамическим зависимостям для идеального газа. Так, величина удельного импульса сопел при отборе жидкой фазы в общем случае на 50...60%, а при отборе пара на 10...20% меньше, чем полученная по расчету при помощи зависимостей для идеального газа. Кроме того, рост удельного импульса в зависимости от геометрической степени расширения сопел на 40...60% превосходит расчетный. Показательно, что влияние температуры различных фаз на удельный импульс сопел различно, причем при отборе пара отмечено снижение удельного импульса с ростом температуры во всем эксплуатационном (0...30°C) диапазоне. Полученные количественные, и, главное, качественные несоответствия теории истечения идеального газа и результатов экспериментов привели к тому, что при дальнейшем проектировании отказались от газодинамических расчетов в виду их полной несостоятельности и были использованы только экспериментальные данные.

В последующие годы нами были разработаны расчетные методики, позволяющие проводить комплексный расчет энергетических параметров подобной установки. Разработана методика расчета параметров потока углекислоты при истечении из сопла Лавала в вакуум [1] и в атмосферу [2], причем с учетом входа скачка уплотнения внутрь сопла. Для расчета изменения параметров внутри баллона с углекислотой, связанного с отбором вскипающей жидкости или насыщенного пара, была разработана методика [3], которая в комплексе с методиками [1] и [2] позволила перейти к определению изменения параметров всей установки в целом во времени [4]. Все методики базируются на использовании теплофизических таблиц параметров углекислоты на линии насыщения [5] в качестве уравнения состояния и основных законов протекания газодинамических процессов в баллоне, системе подачи и соплах. Методики используют предположения, что температура потока двухфазной среды всегда соответствует давлению на линии насыщения, процессы фазовых превращений протекают мгновенно, движение потока внутри сопла одномерное и стационарное. Сравнение результатов расчетов по разработанным методикам с экспериментальными данными, полученными при проведении автономных испытаний сопел в вакууме, в атмосфере и установки в целом



показали, что данный комплекс методик достаточно хорошо отражает физические особенности поведения двухфазной среды в различных процессах, происходящих в баллоне, системе подачи и в газодинамическом тракте сопел и может быть применен при проектировании подобных установок. Универсальность предложенного метода и достаточно хорошая сходимость с результатами экспериментов позволили успешно использовать его для расчета изменения параметров различных видов реальных сплошных сред (азота, воздуха, кислорода, гелия, аргона, воды и т.п.) в ходе тех или иных теплофизических процессов.

В 1998 году в ГKB «Южное» была спроектирована установка, предназначенная для коррекции движения ракеты-носителя «Вега» по каналу управления «Крен» при работе маршевых двигателей I-й и II-й ступеней. Все расчеты, связанные с определением энергетики, запаса рабочего тела, быстрогодействия электрогидроклапанов и выбором геометрических размеров сопел были выполнены при помощи разработанных методик. Отличие в условиях работы этой установки от предыдущей состояло в том, что она должна работать в условиях переменного противодавления, причем изменяющегося от атмосферного до нулевого, поскольку вторая ступень ракеты-носителя должна была заканчивать работать на внеатмосферном участке траектории. Поэтому для выбора геометрических размеров сопел необходимо было в первую очередь выработать соответствующие критерии и принципы оценки эффективности работы установки в целом.

Известна методика расчета оптимального давления на срезе сопла [6], которая заключается в выборе такой степени расширения, при которой двигатель обеспечил бы максимальную конечную скорость полета ракеты при постоянном расходе рабочего тела. В работе [7] рассмотрены другие критерии оптимизации высотности сопел Лавала, применительно к маршевым двигателям и ЭСУ с учетом реальных программ управления полетом. Отмечено, что имеет большое значение выбор таких геометрических размеров сопел, при которых на данной траектории достигался бы максимальный среднеинтегральный удельный импульс. Это позволило бы иметь на борту минимальный запас рабочего тела и минимальные размеры баллонов для его хранения.

Сопла ЭСУ, в отличие от маршевых ракетных двигателей, работают, как правило, в импульсном режиме, поэтому суммарное время включенного состояния сопел может значительно отличаться от времени полета соответствующей ступени ракеты-носителя. При этом время включенного состояния распределяется по траектории, как правило, не-

равномерно. Особенно долго ЭСУ работает на особых участках траектории (во время программных разворотов или во время разделения ступеней), когда при помощи тяговых усилий сопел осуществляется отработка всех возможных возмущений. Для обеспечения эффективности управления на таких участках траектории техническим заданием определяется минимальный уровень тяги, который ЭСУ должна быть в состоянии обеспечить при самом худшем сочетании начальных условий и максимально возможных в это время величинах атмосферного давления.

Обычно при составлении технического задания на разработку ЭСУ задается суммарный импульс сопел

$$I_{P, \tau \Sigma} = \int_0^{\tau_{\Sigma}} P \cdot d\tau, \text{ кгс}\cdot\text{с},$$

величина которого является определяющей не только при выборе вида рабочего тела и его количества, но и при оценке целесообразности применения той или иной принципиальной схемы установки вообще. В техническое задание также входят зависимости давления окружающей среды и требуемого уровня тяги от времени полета.

В процессе решения задачи выбора степени расширения сопел для ЭСУ ракеты-носителя «Вега» установлено, что для однозначного выбора оптимальных геометрических размеров сопел и определения заправки перечисленных требований ( $I_{P, \tau \Sigma}$ ,  $P=f(\tau)$  и  $p_H=f(\tau)$ ) недостаточно. Из этих требований не следует, какой импульс тяги должна вырабатывать установка на различных участках траектории. Ответ на этот вопрос могла бы дать дополнительная характеристика - зависимость вырабатываемого импульса ЭСУ от времени полета ракеты.

Если программный разворот ракеты-носителя предусмотрен в нижних слоях атмосферы, то это значит, что основную долю суммарного импульса ЭСУ должна будет выработать в условиях, близких к наземным. Оптимальная геометрическая степень расширения сопла должна быть, следовательно, ближе к обеспечивающей расчетный режим истечения при атмосферном противодавлении. Если программный разворот или усилия, необходимые при отработке возмущений при разделении ступеней, предусмотрены на значительной высоте ( $p_H \approx 0$ ), то основную долю суммарного импульса ЭСУ будет вырабатывать в условиях, близких к пустотным. Оптимальная геометрическая степень расширения сопел будет больше.

Для практического определения оптимальной геометрической степени расширения сопел Лаваля, используемых в составе ЭСУ, рабо-



тающей на сжиженной углекислоте, следует учитывать специфические особенности этого рабочего тела. Как следует из расчетов и анализа экспериментов для сопел характерен широкий разброс отношения  $p_a/p_k$  в зависимости от фазы отбираемой углекислоты (до 250%), температуры и степени сухости потока перед соплами (до 50%). Спад давления в баллоне зависит от начальных условий работы ЭСУ и, в значительной степени, от фазы отбираемой углекислоты. Даже если давление перед соплами поддерживается редуктором, тяга и удельный импульс сопел не являются постоянными и зависят от параметров отбираемой фазы углекислоты в данный момент времени. Все эти особенности делают невозможным аналитическое решение задачи выбора оптимальной геометрической степени расширения сопел. Задача решается путем подбора таких геометрических размеров сопла, которые бы при минимальной начальной температуре углекислоты и наихудшем сочетании законов изменения давления окружающей среды и выработки суммарного импульса от времени полета обеспечивали бы максимальный среднеинтегральный удельный импульс после выработки заданного суммарного импульса:

$$\bar{I} = \frac{I_{p, \tau \Sigma}}{\Delta M}, \text{ с, где}$$

$\Delta M$  - количество использованного рабочего тела во время полета.

В работе [7] исследовано влияние различных законов набора вырабатываемого импульса от времени полета на оптимальные геометрические размеры сопел Лавала для ЭСУ ракеты-носителя «Вега». Расчеты показывают, что при одном и том же законе изменения давления окружающей среды при разных законах набора суммарного импульса от времени полета наблюдается значительное различие геометрических размеров оптимальных сопел. Так, при равномерном наборе заданного суммарного импульса по траектории оптимальная относительная площадь сопла  $\bar{F}=33,4$ . При начальной заправке 27 кг сжиженной углекислоты и наборе 950 кгс·с суммарного импульса среднеинтегральный удельный импульс составляет 39,4 с. В конце работы в баллонах остается 2,89 кг углекислоты, что исключает полную выработку жидкости из баллонов и, связанные с этим, значительные (2-х кратные) колебания тяги, обусловленные конденсацией при отборе паровой фазы. Если набор суммарного импульса по траектории происходит неравномерно и 80% его вырабатывается при давлении окружающей среды не ниже  $0,8 \text{ кгс/см}^2 \text{ абс.}$  (при работе I-й ступени ракеты-носителя), оптимальное сопло будет иметь относительную площадь  $\bar{F}=18,8$ . Среднеинтегральный удельный импульс

ЭСУ в таких условиях - 36 с. Установка заканчивает работу на паровой подушке. Показательно, что в этом случае заметно снижается диапазон возможных величин диаметра среза сопла, при которых вообще возможна выработка ЭСУ при заправке в баллоны 27 кгс  $\text{CO}_2$  требуемого суммарного импульса. В случае, когда ЭСУ все время работает в наземных условиях, подобрать сопло, которое бы позволило выработать заданный импульс, вообще не возможно. Сопло, которое позволяет выработать максимальный импульс в наземных условиях по расчету должно быть с относительной площадью  $\bar{F} = 12,6$ . Максимально достижимый импульс - 845 кгс·с до момента времени, когда в баллоне, в результате выработки оставшегося пара, реализуются условия для образования твердой фазы углекислоты, способной засорить систему подачи. Таким образом, выработка заданного импульса при наземных испытаниях невозможна и, следовательно, имеются определенные сложности по экспериментальному доказательству способности установки вырабатывать заданный импульс. Действительно, для того, чтобы экспериментально получить требуемый суммарный импульс, нужно практически воссоздать зависимость давления окружающей среды от времени включенного состояния установки, что практически вряд ли осуществимо. Поэтому при наземных испытаниях по выработке суммарного импульса следует учитывать объективную разницу между замеренным импульсом и соответствующим реальным натурным условиям. В ходе отработки нужно будет получить фактические дроссельную и высотную характеристики сопел и при их помощи рассматривать способность установки обеспечить выработку заданного суммарного импульса на реальной траектории.

Существует возможность улучшить энергетические характеристики ЭСУ за счет использования сопел с авторегулируемой высотностью, например, сопел с центральным телом. Расчеты показывают, что подобные сопла дают выигрыш по среднетраекторному удельному импульсу (минимум 4...10%) по сравнению с оптимальными соплами Лаваля, а, следовательно, по экономичности установки в целом. Для оптимальной работы ЭСУ на любой траектории достаточно разработки одной конструкции такого сопла, в то время как оптимальное сопло Лаваля необходимо подбирать для каждой конкретной траектории.

Сопло с авторегулируемой высотностью, таким образом, имеет определенные преимущества перед соплами Лаваля. При достаточной дешевизне изготовления такого сопла имеются сложности по определению его внутреннего профиля. Сопло с центральным телом работает за счет газодинамического поворота сверхзвукового потока, а смоделиро-



вать расчетным путем поведение двухфазной среды в таких условиях пока не представляется возможным. Поэтому разработка такого сопла требует значительного объема экспериментальной отработки со снятием фактических высотных и дроссельных характеристик. Отсутствие такого опыта заставило принять решение об использовании для ЭСУ ракеты-носителя «Вега» сопел Лавалья. Расчетное описание работы сопла с центральным телом и выбор внутреннего профиля, отвечающего особенностям поведения потока двухфазной среды является интересной, но весьма сложной расчетно-экспериментальной задачей, которая, возможно, найдет свое решение в дальнейших работах.

### Список литературы

1. Шамровский Д.А., Пронь Л.В. Особенности термогазодинамического расчета тяговых характеристик сопел, работающих на монотопливе в области фазовых переходов// Космическая техника. Ракетное вооружение. 1995. №4
2. Шамровский Д.А., Пронь Л.В. Методика термогазодинамического расчета истечения сжиженной углекислоты из сопел Лавалья с учетом противодавления// Проблемы высокотемпературной техники: Сб. науч. тр. Днепропетровск, 1998.
3. Шамровский Д.А., Пронь Л.В. Методика термогазодинамического расчета изменения параметров сжиженной углекислоты в области фазовых переходов, связанного с выработкой компонента из гидробака// Космическая техника. Ракетное вооружение. 1997. №1.
4. Шамровский Д.А., Пронь Л.В. Методика расчета интегральных параметров энергосиловой установки, работающей на углекислоте в области фазовых переходов// Космическая техника. Ракетное вооружение. 1998. №1-2.
5. Вукалович М.Г., Алтуний В.В., Теплофизические свойства двуокиси углерода.-М.: Атомиздат. 1965
6. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей/ Под ред. В.М.Кудрявцева. 3-е изд. М., 1989.
7. Шамровский Д.А., Пронь Л.В. Некоторые вопросы выбора геометрических сопел Лавалья энергосиловой установки, работающей на сжиженной углекислоте в области фазовых переходов.// Вісник Дніпропетровського університету. Ракетно-космічна техніка. Випуск 2. 1998.